

深基坑水平位移监测数据分析及预测模型研究

Research on Monitoring Data Analysis and Prediction Model of Horizontal Displacement of Deep Foundation Pit

刘海龙

(南昌市建设工程综合监督事务中心, 南昌 330038)

摘要: 为准确掌握深基坑水平位移变化规律, 基于某工程实测现场监测数据, 先利用统计方法开展其变形特征分析, 再进一步利用动态权重粒子群算法、自适应模糊神经网络和极限学习机构建变形预测模型, 对基坑水平位移预测进行研究。结果表明: 基坑水平位移变化范围为 23.84 ~ 31.96 mm, 平均值为 29.03 mm, 且最大水平位移主要位于 0.74H 处; 基坑预测结果的相对误差范围为 2.02% ~ 2.17%, 具有较高预测精度, 预测模型合理, 预测结果显示基坑水平位移仍会进一步增加, 但增加速率趋于减小, 变形总体趋于稳定。通过基坑变形预测, 掌握了基坑水平位移变化规律, 为其安全施工提供了技术支持。

关键词: 深基坑; 水平位移; 数据分析; 变形预测; 极限学习机

中图分类号: TU433

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 01-0065-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.01.013

LIU Hailong

(Nanchang Construction Engineering Comprehensive Supervision Center, Nanchang 330038, China)

Abstract: To accurately grasp the variation law of horizontal displacement in deep foundation pits, based on the measured deformation data of a certain engineering site, statistical methods are first used to analyze its deformation characteristics. Then, dynamic weight particle swarm optimization algorithm, adaptive fuzzy neural network, and limit learning mechanism are further used to build a deformation prediction model to study the prediction of horizontal displacement in foundation pits. The results show that the horizontal displacement range of the engineering example foundation pit is 23.84 ~ 31.96 mm, with an average value of 29.03 mm, and the maximum horizontal displacement is mainly located at 0.74H; The relative error range of the deformation prediction results of the foundation pit is 2.02% ~ 2.17%, which has high prediction accuracy. The prediction model is reasonable, and the prediction results show that the horizontal displacement of the foundation pit will continue to increase, but the rate of increase tends to decrease, and the overall deformation tends to stabilize. By predicting the deformation of the foundation pit, the horizontal displacement variation law of the foundation pit has been mastered, providing technical support for its safe construction.

Key words: deep foundation pit; horizontal displacement; data analysis; deformation prediction; extreme learning machine

0 引言

在深基坑施工过程中, 水平位移是基坑变形监测过程中的必测项目, 其控制效果可作为基坑支护结构安全性评价的重要依据, 因此, 开展深基坑水平位移研究具有重要意义^[1-2]。目前, 已有相关学者开展了此方面研究, 如蒙国往等^[3]利用 BP 神经网络

岩土力学

构建了基坑水平位移预测模型,取得了良好的预测效果;李涛等^[4]则构建了基坑支护结构水平位移的理论计算方法,计算结果准确度较高;王娟等^[5]开展了水平位移预警研究,为基坑施工提供了理论指导;王才生等^[6]结合监测数据探讨了超深基坑水平变形的变形规律;陈明杰等^[7]利用差分整合移动平均自回归模型实现了基坑深层水平位移的短期预测,并经多种方法验证了预测结果的准确性。上述研究虽取得了相应成果,充分说明开展基坑水平位移研究的重要性,但较少涉及深基坑水平位移现状特征分析及预测研究,加之深基坑所处地质条件及支护形式差异,仍有必要结合具体工程实例开展针对性研究。根据马广臣等^[8]研究成果,自适应模糊神经网络(Adaptive Network-based Fuzzy Inference System, ANFIS)是一种神经网络与模糊数学相结合的预测方法,其不仅具有极强的自适应能力,还能兼顾有模糊推理能力,因此,以其为基础,构建基坑水平位移预测模型,但自适应模糊神经网络的适应度参数具有一定的模糊特征^[9],为保证其预测精度,提出利用动态权重粒子群算法(Dynamic Weighted Particle Swarm Option, DPSO)开展自适应模糊神经网络适应度参数的寻优处理,以确保此参数的最优性。

因基坑变形的非线性特征,DPSO-ANFIS模型的预测结果仍会存在一定预测误差^[10],为进一步提高预测精度,对DPSO-ANFIS模型的预测误差进行补充预测。根据张坤勇等^[11]的研究成果,极限学习机(Extreme Learning Machine, ELM)属前馈神经网络,具有操作简单、预测能力强等优点,且刘银涛等^[12]的研究也表明ELM适用于预测误差的非线性预测,王景春等^[13]利用其实现了基坑变形预测,取得了良好的预测效果;王雪妮等^[14]也验证了ELM在基坑变形预测中的普适性。因此,提出利用其实现DPSO-ANFIS模型预测误差的补充预测,即将基坑水平位移预测模型构建为DPSO-ANFIS-ELM模型。同时,陈艳茹^[15]的研究表明,相对误差指标能很好地评价变形预测精度。

因此,以某工程为案例,先用统计方法对变形特征进行分析,然后动态权重粒子群算法、自适应模糊神经网络和极限学习机构建DPSO-ANFIS-ELM模型,对基坑水平位移的变形预测,以掌握其后续发

展规律,为其施工安全提供技术指导。

1 工程概况

以江西省南昌市某基坑为例,该基坑长约80 m,宽约75 m,开挖深度约17.5 m。基坑西侧为住宅小区,地下车库距红线距离约4.5~6.6 m;南侧为工艺美术馆,3层结构,独立基础,埋深2 m;东侧建筑最高层数4层,距离红线范围约5.0~7.0 m;北侧无上部建(构)筑物,其下部为地库,距离红线约6.0 m。

结合基坑周边情况,判断基坑南侧、东侧支护结构的安全等级为一级,其余两侧均为二级。

据勘察成果,在地形地貌条件方面,基坑区具冲积平原地貌,区内高程范围为19.5~20.5 m,整体起伏较小。区内第四系地层主要为杂填土、淤泥土、细砂、砾砂,下覆基岩主要为粉砂岩,属软岩类。在水文地质条件方面,区内地表水不发育,只是局部低洼处存在一定水塘。地下水类型主要分为上层滞水和裂隙水,其中,上层滞水无统一水位面,埋深0.9~1.7 m;裂隙水埋深7.5~9.3 m,受季节性影响较大,年变幅约2 m。

2 实例分析

2.1 水平位移数据分析

为充分掌握基坑水平位移变化规律,共布设了19个水平位移监测点,其平面图如图1所示。在监测过程中,监测频率为2 d/次,共监测35期。

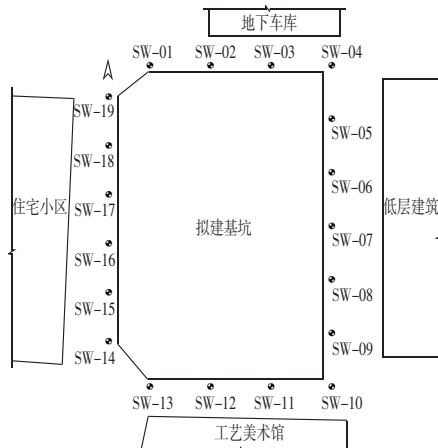


图1 基坑水平位移布置

Fig. 1 Layout of horizontal displacement of foundation pit

19 个监测点的最大累计水平位移值如图 2 所示。不同监测位置处水平位移值存在一定差异, 结合图 1 中监测点的分布位置, 大致得出基坑拐点处的水平位移值相对较小, 其余位置处的水平位移值相对较大, 这与拐点处的刚度相对更大有关, 且水平位移值的变化范围为 23.84 ~ 31.96 mm, 平均值为 29.03 mm, 水平位移在控制范围内, 但变化范围相对较大。

一般来说, 水平位移值越大, 其对应危险相对也越大, 其中, SW-06 监测点和 SW-15 监测点的水平位移值相对最大, 其值分别为 31.96 和 31.58 mm, 因此, 以此 2 个监测点为例开展后续分析。

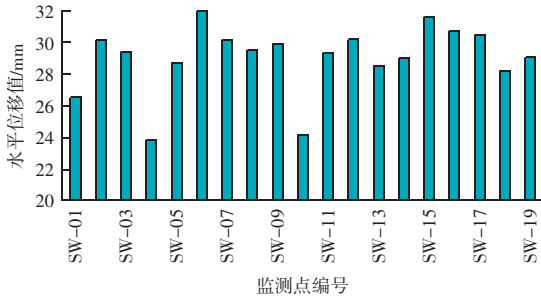


图 2 不同位置处的水平位移值

Fig. 2 Horizontal displacement values at different positions

结合施工过程, 将施工阶段划分为 3 个工况, 即: 工况 1: 施做完地连墙及导墙, 并进行基坑降水; 工况 2: 开挖至第二道支撑中心线下 0.5 m, 并施工第二道支撑; 工况 3: 开挖至底板, 并施工完防水层等结构。

在 3 个工况条件下, SW-06 监测点和 SW-15 监测点水平位移值沿深度上变化规律如图 3 所示。从工况 1 至工况 3, 水平位移值总体呈增加趋势; 同时, 随深度持续, 基坑水平位移呈先增加后减小趋势, 且最大水平位移均发生在 13.0 m 深度处, 结合开挖深度, 其主要位于 $0.74H$ (H 为开挖深度) 处。

SW-06 监测点和 SW-15 监测点最大水平位移处的变形时间曲线如图 4 所示。两监测点的水平位移随时间持续, 早期增加趋势不显著, 但中后期具持续增加趋势。

对变形速率的基本特征参数进行统计, SW-06 监测点: 变形速率范围为 0.07 ~ 2.19 mm/期, 平均值为 0.91 mm/期; SW-15 监测点: 变形速率范围为 0.05 ~ 2.12 mm/期, 平均值为 0.90 mm/期。

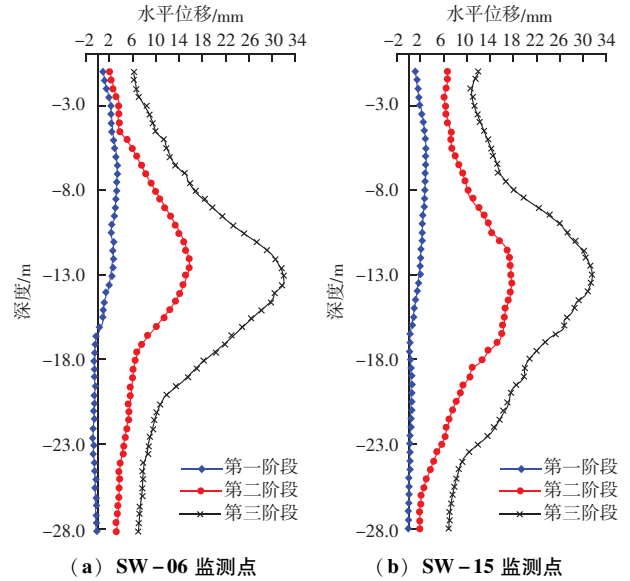


图 3 水平位移值沿深度上的变化规律

Fig. 3 Variation law of horizontal displacement value along depth

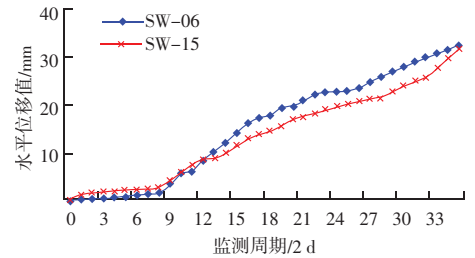


图 4 水平位移的时间变化曲线

Fig. 4 Time variation curve of horizontal displacement

基坑水平位移的变形速率具较大的波动范围, 且两者变形速率始终为正值, 即基坑水平位移始终具增加趋势。

综合上述, 基坑水平位移的变形特征显著, 虽还在变形控制值范围内, 但其变形储备已相对较少, 建议尽快开展主体结构施工, 以保证基坑安全。

2.2 水平位移变形预测分析

建立 DPSO-ANFIS-ELM 模型开展变形预测分析, 将前 30 期数据作为训练样本, 后 5 期数据作为验证样本, 外推预测 4 期。以 SW-06 监测点为例, 详述对比各类过程预测模型的预测效果。SW-06 监测点水平位移预测结果见表 1。各类预测模型的预测效果存在明显差异, 随着模型的不断优化, 相对误差值呈减小趋势。

ANFIS 模型: 相对误差范围为 3.09% ~ 3.37%, 平均值为 3.22%; PSO-ANFIS 模型: 相对误差范围为 2.91% ~ 3.31%, 平均值为 3.03%; DPSO-ANFIS

岩土力学

模型：相对误差范围为 2.47%~2.64%，平均值为 2.57%；DPSO-ANFIS-ELM 模型：相对误差范围

为 2.05%~2.17%，平均值为 2.11%。说明各类优化手段能提高预测精度。

表 1 SW-06 监测点在不同模型中的预测结果

Table 1 Prediction results of SW-06 monitoring point in different models

监测周期 /期	水平位移 实测值/mm	ANFIS 模型		PSO-ANFIS 模型		DPSO-ANFIS 模型		DPSO-ANFIS-ELM 模型	
		预测值/mm	相对误差值/%	预测值/mm	相对误差值/%	预测值/mm	相对误差值/%	预测值/mm	相对误差值/%
31	28.83	27.86	3.37	27.88	3.31	28.09	2.58	28.24	2.05
32	29.67	28.75	3.09	28.79	2.95	28.89	2.61	29.04	2.11
33	30.55	29.59	3.15	29.66	2.91	29.80	2.47	29.92	2.06
34	31.24	30.22	3.26	30.29	3.02	30.44	2.56	30.57	2.14
35	31.96	30.93	3.22	31.02	2.94	31.12	2.64	31.27	2.17

再对 SW-15 监测点及外推预测，结果见表 2。统计得到 2 个监测点预测结果，SW-06 监测点：相对误差范围为 2.05%~2.17%，平均值为 2.11%；SW-15 监测点：相对误差范围为 2.02%~2.13%，平均值为 2.08%。

据上，在 2 个监测点的预测结果中，相对误差均值相当，说明两者预测精度相近，进一步说明 DPSO-ANFIS-ELM 模型在基坑水平位移预测结果中不仅具有较强的预测精度，且外推预测结果显示，基坑水平位移后续仍会增加。

表 2 基坑水平位移最终预测结果

Table 2 Final prediction results of horizontal displacement of foundation pit

监测周期 /期	SW-06 监测点			SW-15 监测点		
	水平位移 /mm	预测值 /mm	相对 误差值 /%	水平位移 /mm	预测值 /mm	相对 误差值 /%
31	28.83	28.24	2.05	24.96	24.44	2.10
32	29.67	29.04	2.11	25.68	25.15	2.08
33	30.55	29.92	2.06	27.49	26.90	2.13
34	31.24	30.57	2.14	29.61	29.01	2.02
35	31.96	31.27	2.17	31.58	30.93	2.07
36		32.35			31.59	
37		33.19			33.02	
38		33.66			34.36	
39		34.07			35.98	

为进一步掌握基坑水平位移变形规律，再对实测 32~35 期的变形速率均值进行计算，命名 V_1 速率，并对外推预测 36~39 期的变形速率均值进行计算，命名为 V_2 速率；通过对比 V_1 速率和 V_2 速率来判断基坑水平位移的发展趋势，结果如图 5 所示。2 个监测点 V_2 速率均是更小，说明随时间持续，基坑水平位移趋于减小趋势，变形趋于稳定，SW-15 监测点的变形速率相对更大，说明其后续水平位移会增加更多。

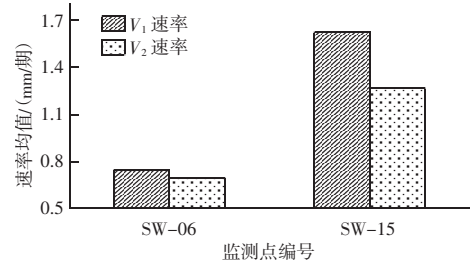


图 5 变形速率预测前后对比

Fig. 5 Comparison of deformation rate before and after prediction

综上所述，基坑水平位移的变形特征较为显著，且后续仍会增加，只是增加速率趋于减小，变形趋于稳定。

3 结论

通过深基坑水平位移监测数据分析及预测模型研究，主要得出如下结论：

(1) 经试验成果统计，工程案例基坑水平位移的变化范围为 23.84~31.96 mm，平均值为 29.03 mm，虽还在变形控制值范围内，但其变形储备已相对较少，且最大水平位移主要位于 $0.74H$ (H 为开挖深度) 处。

(2) DPSO-ANFIS-ELM 模型适用于基坑水平位移预测，预测结果具有较高的预测精度及稳定性，且基坑水平位移后续仍会增加，只是增加速率趋于减小，水平位移总体趋于稳定。

参考文献

- [1] 李常茂, 祝和意. 软土深基坑的空间变形特性分析及危险性评估 [J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17 (1): 116-121.
- [2] 鞠兴华, 刘禹阳. 基于多元信息融合的基坑预警分级研究 [J]. 水利水电技术 (中英文), 2021, 52 (1): 129-136.
- [3] 蒙国往, 刘家梁, 黄劲松, 等. 基于 BP 人 (下转第 88 页)

岩土力学

才可采取后续施工。

3 结论

通过变质软岩隧道大变形稳定性评价及防治分级研究, 所得结论主要为:

(1) 在研究断面中, 当隧道出现大变形时, 水平收敛的变形范围为 142.03 ~ 219.28 mm, 平均值为 180.42 mm; 拱顶沉降的变形范围为 153.20 ~ 251.62 mm, 平均值为 200.05 mm。因此, 其变形值已明显大于变形控制值 120 mm, 变形特征显著, 开展其稳定性评价及防治分级研究显得尤为重要。

(2) 通过尖点突变分析的稳定性评价, 得出水平收敛的 Δ 值均大于拱顶沉降的 Δ 值, 说明在大变形段, 拱顶沉降具相对更大的失稳、塌方风险。

(3) 在隧道大变形段的防治分级结果中, 两类判据的分级结果存在一定差异, 按不利原则, 建议研究的大变形断面均按 IV 级进行防治。

参考文献

- [1] 李永靖, 王松, 刘维青, 等. 某隧道穿越富水断层破碎带围岩大变形成因分析及稳定性预测 [J]. 矿业研究与开发, 2023, 43 (5): 84-90.
- [2] 胡涛涛, 钱兴邦, 涂鹏, 等. 基于优化支持向量机的高地应力炭质板岩隧道大变形灾变预测 [J]. 兰州大学学报 (自然科学

版), 2022, 58 (5): 607-615.

- [3] 宁波, 刘玉健, 王安东. 巨型古滑坡的稳定性评价及发展趋势分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 2022, 42 (5): 515-519.
- [4] 吴大勇. 小寨山隧道洞口段塌方成因分析及变形预测 [J]. 长江科学院院报, 2020, 37 (9): 79-86, 95.
- [5] 周涛, 邹进贵, 郭际明. 隧道变形监测与智能预警方法研究 [J]. 测绘通报, 2022 (增刊 2): 91-94.
- [6] 李晓斌. 软岩隧道大变形预警分级研究及发展趋势 [J]. 地质与勘探, 2021, 57 (5): 1149-1157.
- [7] 段中兴, 杜婉欣. 基于 GWO-LSTM 模型的隧道车流量预测与照明调节研究 [J]. 现代隧道技术, 2024, 61 (3): 157-165.
- [8] 王锋. 基于 SSA-LSTM 模型的软岩隧道变形特征智能预测及应用研究 [J]. 现代隧道技术, 2024, 61 (1): 56-66.
- [9] 邓小鹏. 基于信息分解的滑坡变形稳定性评价及预警分析 [J]. 人民长江, 2021, 52 (5): 101-107.
- [10] 鞠兴华, 刘禹阳. 基于多元信息融合的基坑预警分级研究 [J]. 水利水电技术 (中英文), 2021, 52 (1): 129-136.
- [11] 侯守江. 基于多元算法融合的软岩隧道围岩变形预测模型及应用研究 [J]. 现代隧道技术, 2023, 60 (6): 151-164.
- [12] 赵楠, 李洁. 基于 LSTM-SVM 的隧道围岩位移预测 [J]. 公路, 2021, 66 (6): 404-407.
- [13] 吕擎峰, 李钰, 牛荣, 等. 基于深度学习的特殊岩土隧道围岩变形预测研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2023, 31 (6): 1590-1600.
- [14] 周兰庭, 柳志坤, 徐长华. 基于 WA-LSTM-ARIMA 的混凝土坝变形组合预测模型 [J]. 人民黄河, 2022, 44 (1): 124-128.

(上接第 68 页)

- [1] 王神经网络的深基坑围护结构水平位移预测研究 [J]. 都市轨道交通, 2022, 35 (3): 80-88.
- [4] 李涛, 杨依伟, 周予启, 等. 深基坑内支撑拆除时支护结构水平位移计算方法 [J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41 (增刊 1): 3021-3032.
- [5] 王娟, 王兴科. 软土地区基坑侧位移变形预警及预测 [J]. 长江科学院院报, 2021, 38 (8): 91-96, 103.
- [6] 王才生, 张维东, 裴涛涛, 等. 28 m 超深地铁车站基坑实测数据分析 [J]. 现代隧道技术, 2024, 61 (增刊 1): 787-795.
- [7] 陈明杰, 李平杰, 金延儒, 等. 临水深基坑素咬合止水桩土石围堰深层水平位移预测 [J]. 建筑结构, 2023, 53 (增刊 2): 2568-2575.
- [8] 马广臣, 杨杰, 程琳, 等. 基于 DPSO-ANFIS 的大坝变形预测模型 [J]. 水利水运工程学报, 2021 (6): 116-123.
- [9] 刘开云, 魏博, 刘保国. 边坡变形时序分析的进化-自适应神经

模糊推理模型 [J]. 北京交通大学学报, 2012, 36 (1): 56-62.

- [10] 朱靛. 基于 MF-DFA 法和 PSO-ELM 模型的基坑变形规律研究 [J]. 长江科学院院报, 2019, 36 (3): 53-58.
- [11] 张坤勇, 苏政凯, 聂美军, 等. 基于 ISSA-ELM 的土体参数反演与变形预测方法 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2024, 32 (5): 1434-1448.
- [12] 刘银涛, 任超. 基于 SSA-ELM 算法的基坑地表沉降预测 [J]. 桂林理工大学学报, 2024, 44 (3): 471-475.
- [13] 王景春, 宋培林, 王炳华, 等. 基于 EMD-PSO-ELM 的基坑变形时变序列预测研究 [J]. 铁道标准设计, 2020, 64 (9): 103-108.
- [14] 王雪妮, 韩国锋. 地铁车站深基坑的变形预测及稳定性研究 [J]. 长江科学院院报, 2018, 35 (10): 77-81, 87.
- [15] 陈艳茹. 基于遗传算法和极限学习机的智能算法在基坑变形预测中的应用 [J]. 隧道建设 (中英文), 2018, 38 (6): 941-947.